

角水槽における自航模型船の最適加速法

菅 信*・猿田俊彦*

Optimum Acceleration for Rapid Convergence
to Final Speed of a Free-Running Model

By

Makoto KAN and Toshihiko SARUTA

Abstract

When self propulsion tests both in still water and in waves are carried out in the basin without a towing carriage like Mitaka No. 1 Ship Experiment Tank ($L \times B = 80\text{m} \times 80\text{m}$), there is a problem that the test data with high accuracy can not be obtained because of the restriction of the effective water area. In order to solve this problem the method of the optimum acceleration of the model for the rapid convergence to a final speed using the propeller is proposed and it is shown that the test data of high accuracy are obtained by means of the proposed method.

The equation of motion for the accelerated model and its solution are expressed analytically and the characteristics of the accelerated motion are discussed with relation to the propeller characteristics, self propulsion factor, resistance and virtual mass of the model.

Several methods for evaluating the optimum time of the acceleration by the propeller are presented and it is shown that the agreement between the evaluation and experiments is satisfactory.

The accelerated motion of the model in waves is also examined and the optimum acceleration time is shown to be shorter than that in still water.

The difference between a container ship and an ore carrier concerning the characteristics of the accelerated motion is examined and it is concluded that the optimum acceleration time of the ore carrier requires two or three times as long as that of the container ship in normal sea speed respectively, and that the ore carrier is more affected by the added resistance due to waves than the container ship.

目 次

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. プロペラ増速のない場合の実験例 3. プロペラ増速のある場合の実験例 4. 加速模型船の運動方程式 5. 最適加速法 | <ol style="list-style-type: none"> 6. 慣性力に対しプロペラスラストが大きい船の最適加速時間の検討—コンテナ船の場合— <ol style="list-style-type: none"> 6.1 平水中 <ol style="list-style-type: none"> 6.1.1 最適加速時間の理論式から推定する方法 6.1.2 プロペラ増速なしの模型実験から推定する方法 6.1.3 プロペラ増速なしの模型実験から推定す |
|---|--|

* 運動性能部

原稿受付：昭和59年8月31日

る簡易法 1

6.1.4 プロペラ増速なしの模型実験から推定する簡易法 2

6.2 波浪中

7. 慣性力に対しプロペラスラストが小さい船の最適加速時間の検討—鉱石船の場合—

8. まとめ

参考文献

付録 1. 航跡自画装置の更新されたデータ解析部

付録 2. 船の加速運動の方程式の解

1. ま え が き

当所の三鷹第 1 船舶試験水槽（長さ・幅・深さ＝80 m×80m×4.5m，以後角水槽と略記する）のように曳引台車のない水槽で自航模型船による各種の模型試験を行う場合，模型船の速力が一定になる前に水槽の有効水面を使いきってしまつて，精度の良い実験を行いくいという問題がある。特に速力に関して敏感な現象を調べようとする場合とか，プロペラの荷重度によって変化する量を計測しようとする場合，あるいは不規則波中の実験のように定速に達した状態で長時間のデータを必要とする場合などは，この問題は現在の角水槽における実験精度上の弱点のひとつであり，是非とも改善されなくてはならない実験技術上の課題である。

将来，自航模型船の対地速力を検出する精度の良い安定したセンサーが開発され導入されれば，速力をフィードバックして模型船の駆動系に自動制御をかけ，できるだけ短時間に目標速力に達するようにし，その後は必要に応じて，回転数一定制御なり，トルク一定制御，またはもっと一般的なエンジンシミュレーションの制御にきりかえるなどして，この問題は解決されとも考えられるが，当面そのような見込みがないと判断される。

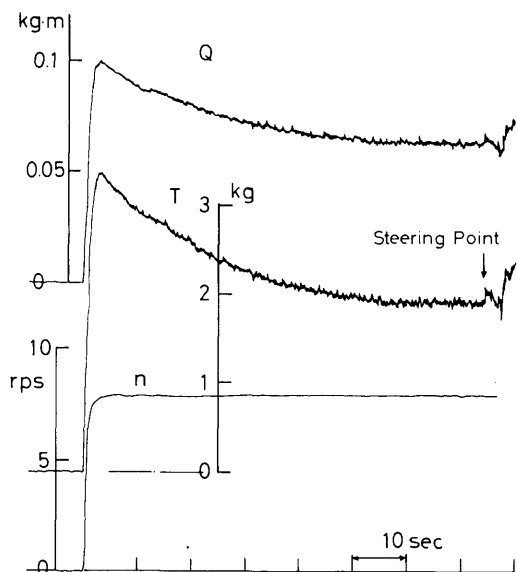
そこで，ここではもっとも簡単に実現できる方法として，自航模型船のプロペラを使った加速によって，模型船をできるだけ早く定速状態に到達させるための最適加速法について検討した。最適加速法というのは，プロペラを駆動系の制限範囲内のできるだけ高い回転数で一定時間回転させて模型船を加速し，目標速力に達した瞬間に，その目標速力に対応する本来の設定回転数まで落として運転するという当然の方法である。しかし，ここでは速力センサーを使用しないことを前

提にしているのであるから，目標速力に達した瞬間というのは判らないことになる。また目標速力に対応するプロペラ回転数というのも，実験前には判らないのが普通である。角水槽における実験では，同一状態で，回転数のみ変えて数航走し，目標速力に対する値を内挿するという方法を通常とっているから，適当に選んだ設定回転数とこれに対する増速回転数を与えたときに，加速時間を最適値に設定できるかどうか，実験技術上のポイントである。この最適値は，増速回転数でプロペラを回し始めてから，設定回転数で最終的に出る筈の速力に達するまでの時間のことであるが，簡単な推定法による推定値が，試行錯誤的に模型実験で求めた最適加速時間の実験値と比較的良好一致することが判り，また波浪中実験の場合の最適加速時間についても一定の見解が得られ，今後の角水槽における実験精度の向上に寄与するものと考えられるので，これらの検討結果について以下に述べる。

2. プロペラ増速のない場合の実験例

曳引台車のない角水槽における自航試験では，模型船の速力の整定を早めるためにプロペラ回転数を設定回転数より高い回転数で一定時間運転するということが当然考えられる。しかし，以前に使用していた磁歪式自航動力計¹⁾の特性にヒステリシス現象がみられたことから，スラストやトルクの精度が悪くなることを懸念してこれまでの角水槽における自航試験では，プロペラ増速による模型船の加速は行わず，最初から設定回転数で発進させ自然に速力が整定するのを待つか，あるいは手で適当に押し出す力をこれに添えるという方法がとられてきた。

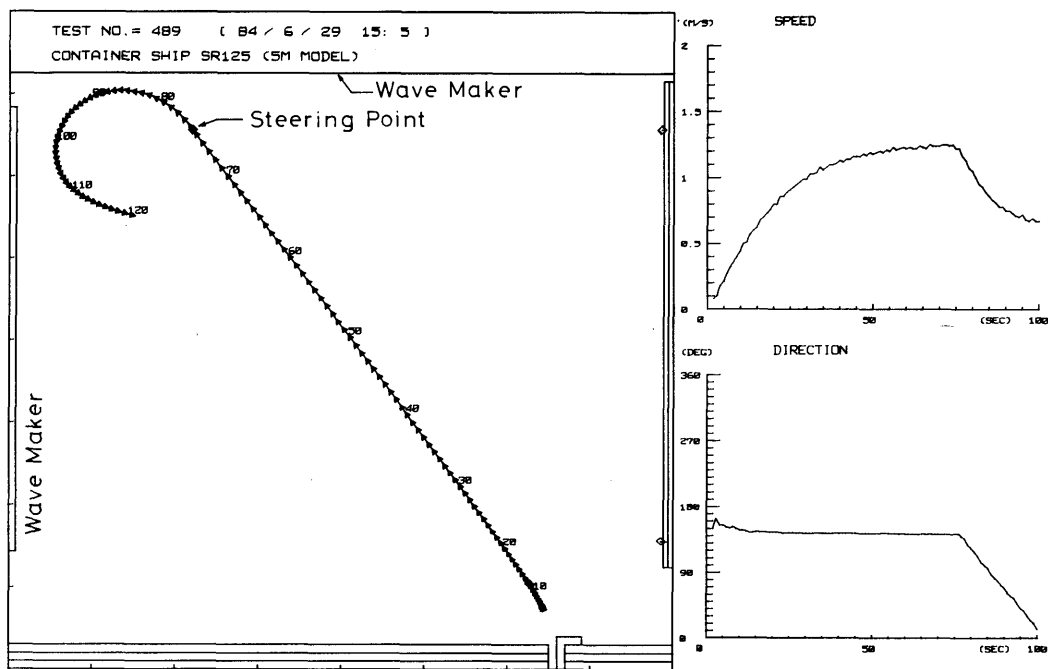
Fig. 1 は角水槽で行ったあるコンテナ船模型の平水中自航試験における(a)スラスト，トルク，回転数，及び(b)模型船重心の航跡，速力，方位の記録の一例である。これはプロペラ増速による加速を全く行っていない場合の例であるが，手で押し出す力を加える程度の加速方法ではこれと大差のない結果となる。(a)図と(b)図の時間軸は両者が別の計測系統であり，同期信号は記入していないが，(b)の航跡図で航跡測定開始後76秒目のところで左旋回のための操舵をした時点が，(a)図の記録の終わりの方でスラスト，トルクの急変しているところに対応している。このスラスト等が急変する前までの有効な記録の終わりの方は，角水槽の造波板直前でとられたものであり，角水槽の水面を最大限有効に使っていることが航跡図との対応から判る。Fig.



(a) thrust, torque, revolution

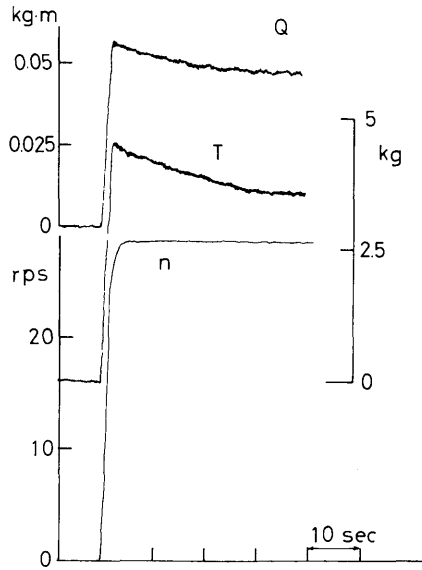
2は鉾石船模型の場合について同様の記録例を示したものであるが、低速肥大船の場合も事情は同じであることが判る。

Fig. 1のスラスト、トルク、速力のような実験記録の場合、これらの値が安定したとみなせるかどうか微妙であるが、これ以上の記録がとれないので止むを得ず記録の終わりの方の値を読みとっている。Fig. 3の○印、△印、□印はこれらの値をプロペラ回転数を横軸にして示したものであり、実線はそれらの平均的なところを示すものである。一方、●印、▲印、■印を一点鎖線で結んだ線は、同じコンテナ船模型を使って、三鷹第3船舶試験水槽（長さ・幅・深さ=150m×7.5m×3.5m、以後中水槽と略記する）において荷重量変更法²⁾による自航試験を行い、模型船自航点の値を内挿して求めた点を結んだものである。この場合は、クランプ装置を介して曳引台車で模型船を所定の速力まで到達させてからクランプを外して自航状態を保つ通常の曳航水槽における摩擦修正なしの自航試験と同等



(b) trajectory, speed, direction

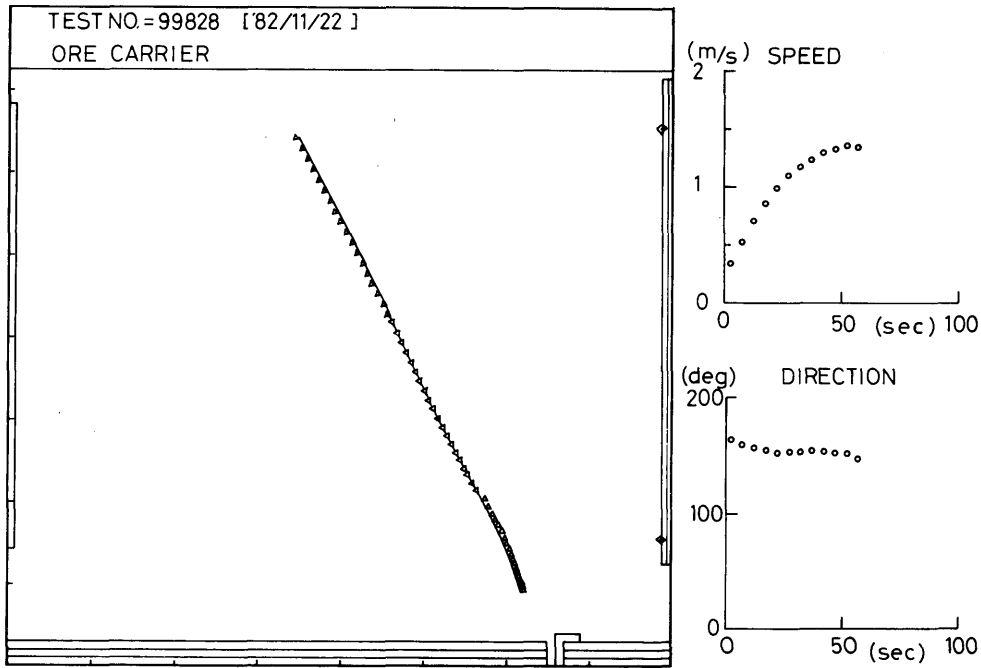
Fig.1 Example of record of self-propulsion test of a container ship in still water
($n_e = 8$ rps, $FN = 0.18$, without acceleration)



(a) thrust, torque, revolution

と考えてよいものである。Fig. 3 と同様の図を鉱石船の場合について示したものが Fig. 4 であるが、いずれの場合も、角水槽と中水槽における実験値の差が歴然としている。同じプロペラ回転数で自航している模型船の速力が、角水槽では中水槽よりも遅いという結果であるから、これは角水槽の方の実験において、記録の終わりの方のデータを読みとった付近でも、まだ船が加速状態にあって、速力がこの回転数で出る筈の最終速力に達していなかった。従ってスラスト、トルクもまだプロペラの前進係数が低い状態にあって最終的に落ちつく筈の値より高く出たものと解釈するのがもっとも自然であろう。

平水中及び規則波中の実験では、最終的に落ちつくであろう値を加速中の実験記録から curve fitting 等の方法で外挿して、中水槽の実験値に近づけることは可能かもしれないが、不規則波中の実験では、定速に達した状態で長時間のデータが必要なのであるから、精度の良い実験データをとるためには、適切な加速に



(b) trajectory, speed, direction

Fig. 2 Example of record of self-propulsion test of an ore carrier in still water ($n_e = 28.5\text{rps}$, $FN = 0.21$, without acceleration)

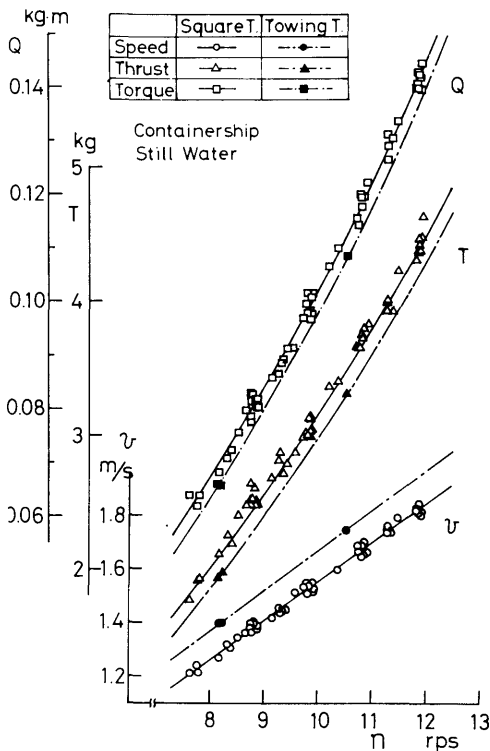


Fig. 3 Difference of results of self-propulsion test between square tank and towing tank (container ship, in still water)

より模型船を早く定速状態にすることがどうしても必要であることが判る。

波浪中自航試験の場合も、Fig. 5に角水槽における実験記録の一例を示してあるが、平水中の場合と同じ理由でプロペラ増速による加速をしないで行った角水槽の実験は、荷重量変更法による中水槽の実験と比べると同じプロペラ回転数に対し速度は低く、スラストとトルクは高いという結果が得られている。それを示す図は平水中の Fig. 3や Fig. 4と同様なので掲載していないが、それらのデータから解析される $1-w$ などの自航要素の値も、当然角水槽と中水槽では異なる値が出ることになり、コンテナ船についての一例を Fig. 6に示してある。特に $1-w$ についての両水槽の値の差が顕著である。 $1-w$ については、速度一定の条件でスラスト一致法で解析する場合、同じ速度に対するプロペラ回転数 n とスラスト T は、角水槽の方が中

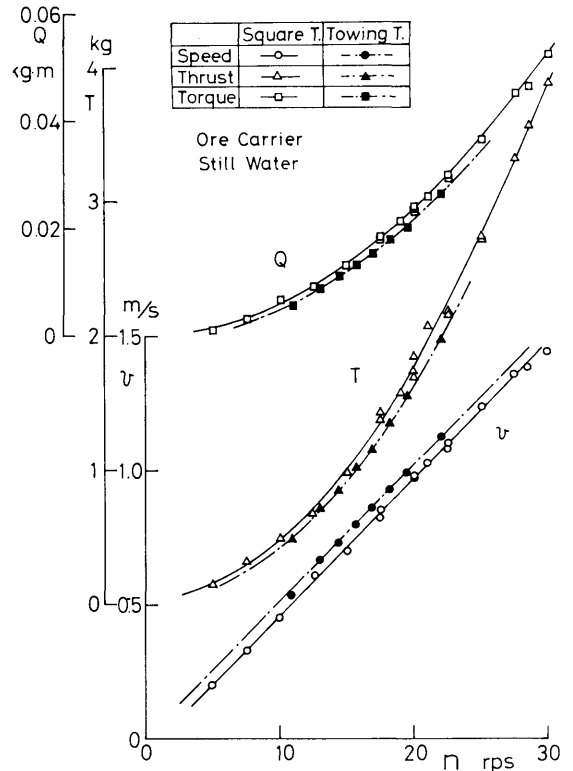
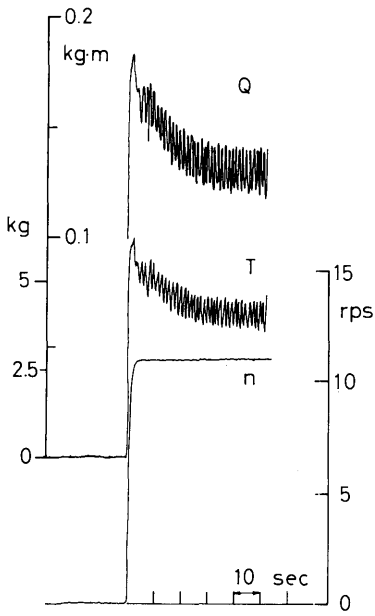


Fig. 4 Difference of results of self-propulsion test between square tank and towing tank (ore carrier, in still water)

水槽より高く、特にスラストの方は同一回転数に対する両水槽の差よりも一層大きくなる。従って係数 $K_T = T/\rho n^2 D^4$ の値でみた場合、両水槽での T と n の差は分母と分子で相殺されるため、プロペラ単独性能曲線から解析される $1-w$ に両水槽の差がほとんど出てこない結果になったものと解釈できる。波浪中のスラスト増加についても Fig. 7にコンテナ船の一例を示してあるが、角水槽と中水槽の違いは少なくかなり良い一致を示している。これはスラストの値自身は角水槽と中水槽で違っているが、波浪中と平水中の差をとるスラスト増加という形では、両水槽の差がやはり相殺されるためであると考えてよい。

なお、Fig. 1と Fig. 2で航跡等の図の形式が異なっているのは、昭和58年10月に航跡自画装置の解析作画部分を従来のFACOM-R⁷⁾からSORD-M343に更新した際に出力形式を変えたが、鉱石船はそれ以前に、

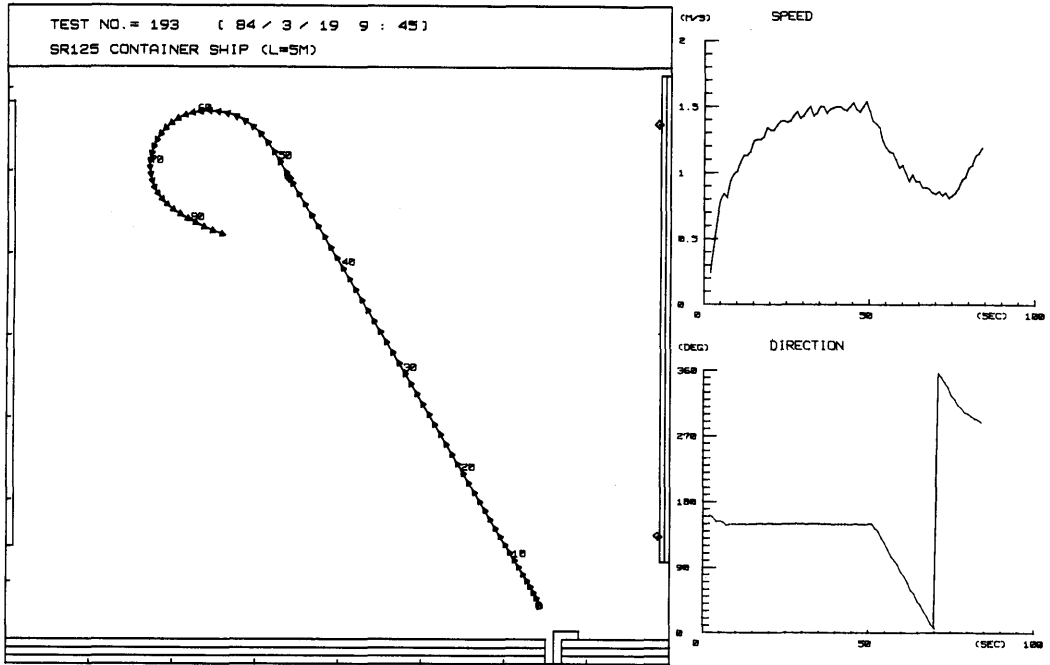


(a) thrust, torque, revolution

コンテナ船はそれ以後に実験を行ったためである。SORD-M343による新しい解析作画部分の構成とプログラムについては、附録1に概要を記してある。

3. プロペラ増速のある場合の実験例

プロペラ回転数の増速による意識的な加速をすることによって自航動力計の計測精度が悪くなることを懸念して、これまでの自航試験ではこのような意識的な加速は行わなかったが、先に述べたように特に不規則波中の実験では適切な加速がどうしても必要と判断されたため、加速の条件をいろいろに変えて実験を行ってみた。加速の方法は、Fig. 9等の回転数の記録にあるように増速回転数 n_a で S 秒間加速した後、設定回転数 n_e に落とすという方法である。実験技術的には、模型船に搭載されているモーター駆動制御装置の指令信号が、この制御装置についている回転数設定ダイヤルの設定値による内部系統と無線で模型船外部から送られてくるアナログ電圧による外部系統とに、無線で切



(b) trajectory, speed, direction

Fig. 5 Example of record of self-propulsion test of a container ship in wave ($\lambda/L=1.1$, $h=7.5\text{cm}$, $x=150^\circ$, $FN=0.21$, without acceleration)

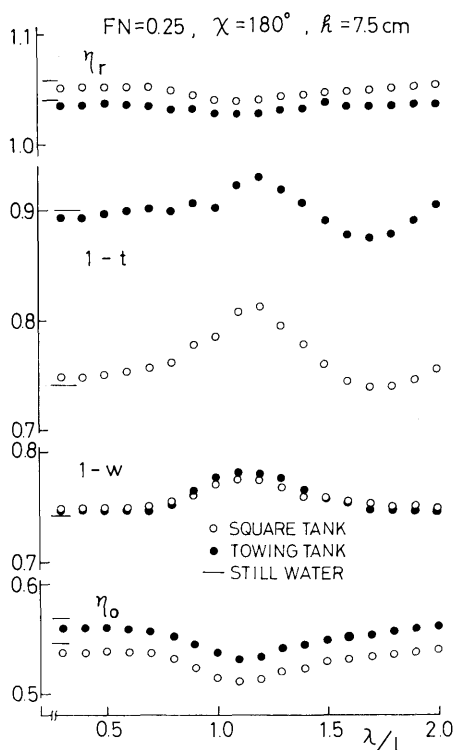


Fig. 6 Difference of self-propulsion factors in waves between square tank and towing tank (container ship)

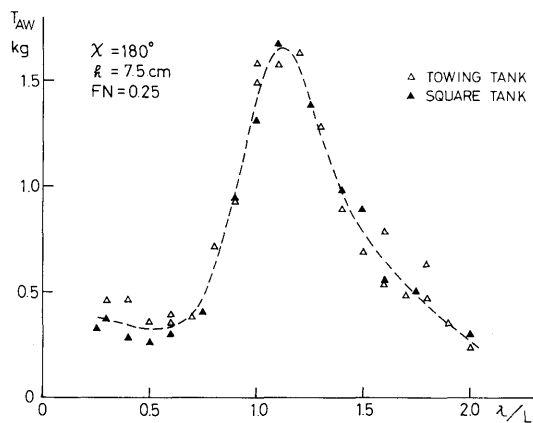


Fig. 7 Comparison of thrust increase in waves between square tank and towing tank (container ship)

換えができるようになっていいる機能を利用する。最初指令信号を外部系統にしておき、試験開始と同時に無線送信機で増速回転数 n_a に相当するアナログ電圧をステップ状に送信し、 S 秒後に指令信号を内部系統に切替えるという方法である。ステップ状に指令信号を与えるとんでも、これは人間がスライド式のレバーで0から与えるため、またモーターを含む制御系の遅れのため、プロペラ回転数は必ずしもステップ状とはならないが、実験記録から加速時間を読むときは、ステップ状になったものと仮定して面積が同じになるようにして読んでいる。

コンテナ船の平水中自航試験結果の例を Fig. 8 に示す。図中▽印は加速時間 S が長過ぎた場合の実験点を示し、以下▼印は加速時間がやや過大だったと判断される場合、●印は加速時間が適切だった場合、▲印はやや不足と判断された場合、△印は不足だった場合というある程度主観的な判断も含めた分類をして実験点を分けて示してある。この図によると、プロペラ回

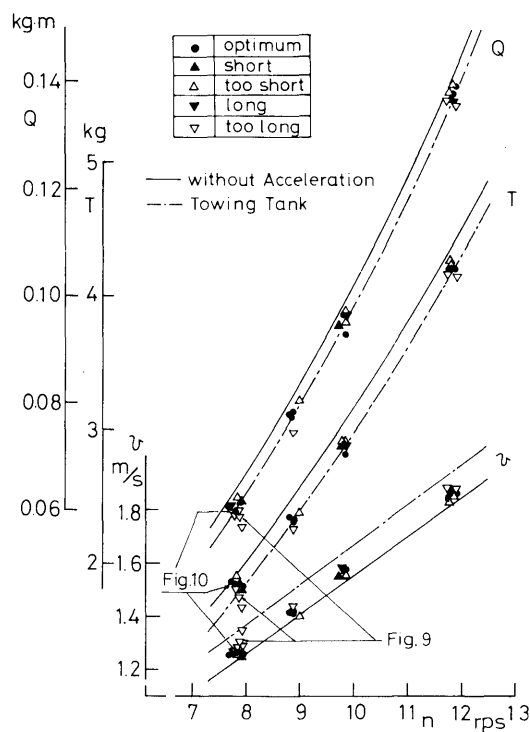
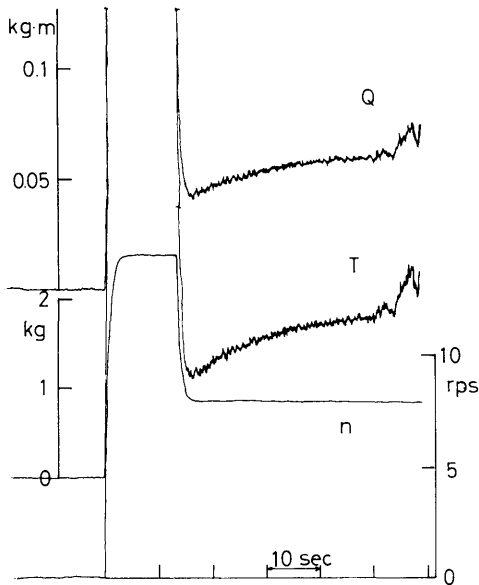


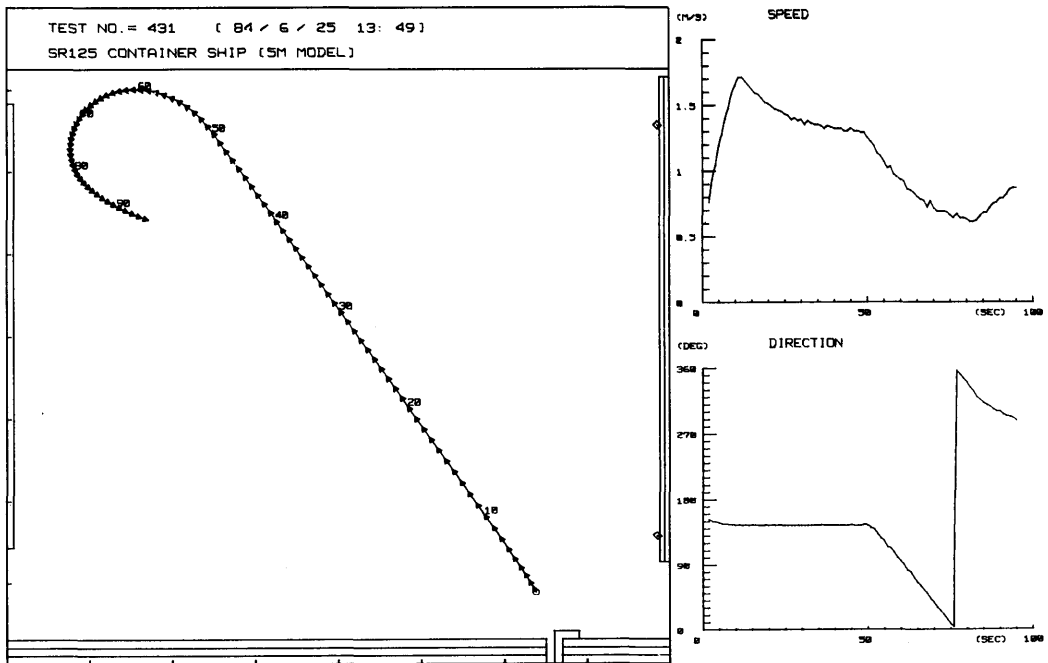
Fig. 8 Results of self-propulsion test with various accelerating condition (container ship)



(a) thrust, torque, revolution

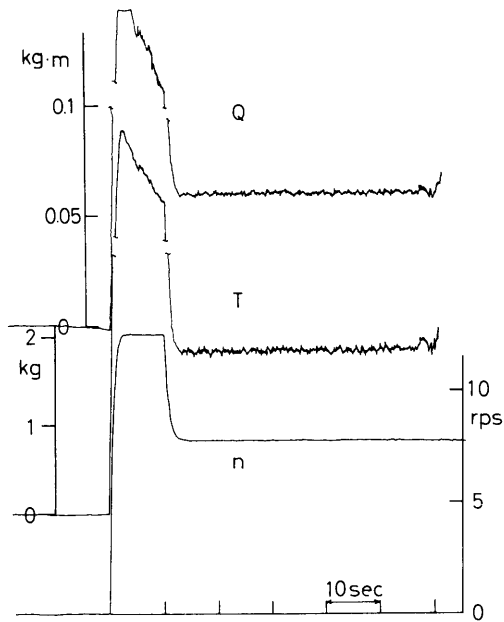
回転数の増速によって模型船を意識的に加速することによって得られたデータが、プロペラ増速なしの実験結果 (Fig. 3 参照) よりも、中水槽の実験結果に近づいており、特にスラストとトルクは中水槽の結果と一致するようになってきたことが明らかである。しかし、速力の方はまだ中水槽の結果と一定のへだたりがある。これは、角水槽における模型船の船位測定精度が充分でなく、1秒毎の船位のデータから船速を計算する現在の計測方法の精度に多少問題がある可能性も否定できないが、その点については今回扱っているテーマと別の性質のものと考えられるのでここでは触れないことにする。

Fig. 9 に加速時間が長過ぎた場合、即ち Fig. 8 でいう▽印の場合の実験記録の例を示す。この場合は、記録の終わりの方で読んだ速力の値は、まだ充分整定していないので (b) 図参照)、この回転数で出る筈の最終速力より高い値を読んでいることになり、従ってスラスト、トルクは低く読んでいることになる筈である。実際、Fig. 8 でこの実験点はスラストとトルクでは中



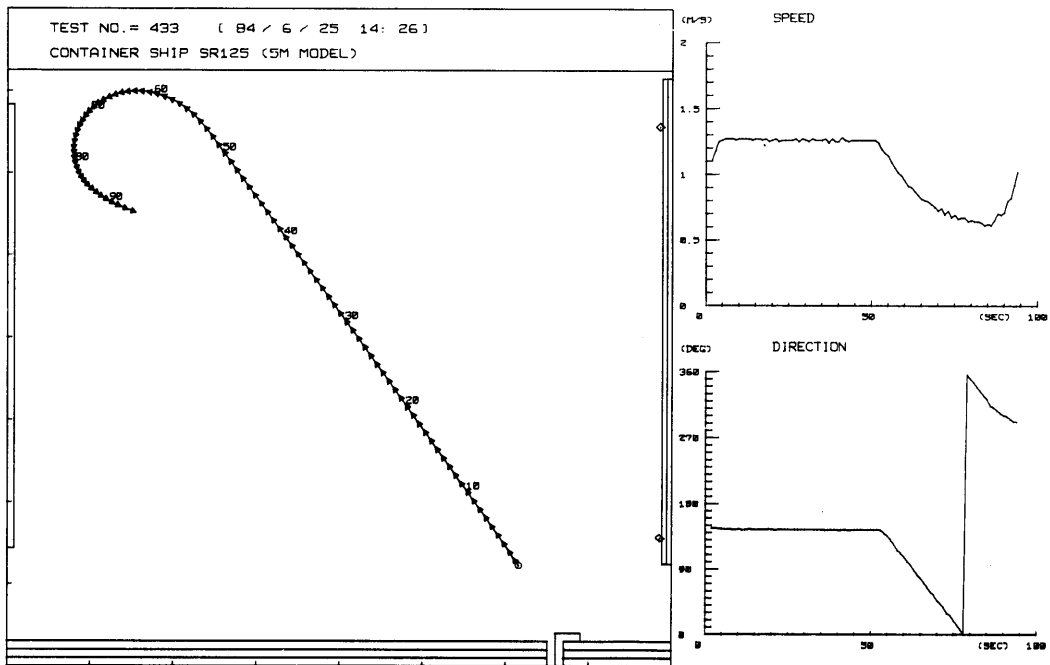
(b) trajectory, speed, direction

Fig. 9 Example of record of self-propulsion test with over-acceleration
(container ship, in still water, $FN=0.18$, $n_e=8$ rps, $n_a=15$ rps, $S=13$ sec)



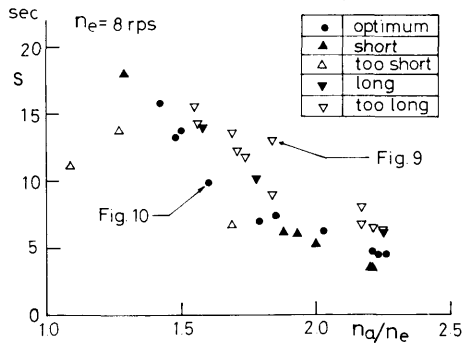
(a) thrust, torque, revolution

水槽の結果より低目に出ている。速力の方は中水槽の結果より高目には出していないが、これは上に述べたように角水槽の船速測定精度の問題があるためかもしれない。Fig. 10に加速が適切であった場合、即ち Fig. 8でいう●印の場合の記録例を示す。はじめから終わりまできれいに整定しており、すべての実験がこのような状態で行えれば理想的であることが良く納得できる例である。このような適切な加速の条件がどのようなものであるかを試行錯誤的に探すために、増速回転数 n_a と加速時間 S をいろいろ変えて行った平水中の実験結果を Fig. 11 に示してある。図の実験点の記号の分類は Fig. 8 と同じであり、適切な加速時間は、増速回転数が高くなるほど短くなるという当然の傾向を示しているが、増速回転数の高いところの実験点がないのは次のような理由による。即ち使用した模型船のモーター駆動制御装置は、プロペラが無負荷であればプロペラ回転数で 30 rps まで可能であるが、自航動力計の容量がスラストで 10 kg でありこれの 150% 過負

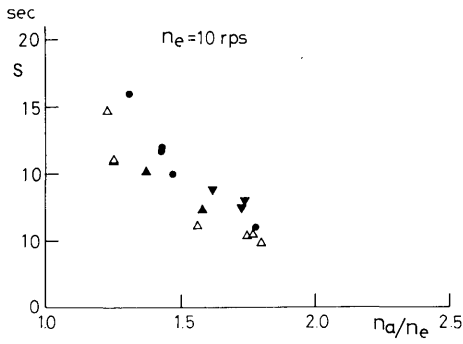


(b) trajectory, speed, direction

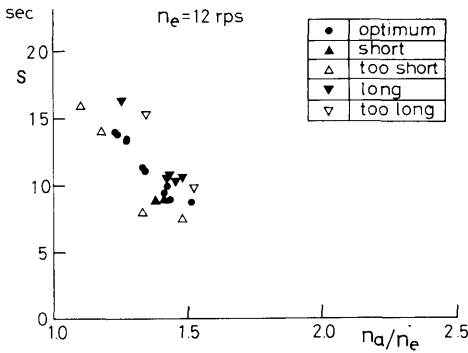
Fig. 10 Example of record of self-propulsion test with optimum acceleration
(container ship, in still water, $FN=0.18$, $n_e=8\text{rps}$, $n_a=12.8\text{rps}$, $S=9.9\text{sec}$)



(a) $n_e=8\text{rps}$ ($FN=0.18$)



(b) $n_e=10\text{rps}$ ($FN=0.22$)



(c) $n_e=12\text{rps}$ ($FN=0.26$)

Fig. 11 Results of model tests on optimum acceleration (container ship, in still water)

荷のあたりから安全装置のストッパーが働いたため、増速回転数として18rps以上を使うことができなかったためである。

なお、この自航試験で使用した自航動力計は最新新

たに製作された抵抗線歪式のもので、以前の磁歪式のものに比べると直線性も安定性も極めて良好で、プロペラ回転数の増速を一定時間行ってから設定回転数に戻すという運転を行っても、そのためにスラスト、トルクの計測精度が悪くなるという懸念はないことが確認されたことを付記しておく。

4. 加速模型船の運動方程式

模型船がプロペラで加速されているときの運動方程式は、次のように表わせる。

$$m\dot{v} = T(v, \dot{v}, n) - R(v, \dot{v}, n) \quad (1)$$

ここで、 m は船の質量、 T はプロペラの発生するスラスト、 R は船が受ける抵抗、 n はプロペラ回転数、 v は船速、 \dot{v} は加速度である。

このままの形では、加速運動の性質が全くつかめないため、次のような取扱いをする。まず抵抗 R に関しては、これを慣性抵抗と定速運動に対する抵抗とに分ける。慣性抵抗の方は、フルード数 $FN = \infty$ に対する附加質量を $m_x(\infty)$ 、 $FN = 0$ に対する附加質量を $m_x(0)$ とすると、 $m_x(\infty) \cdot \dot{v}$ から $m_x(0) \cdot \dot{v}$ まで複雑に変化するが、船の加速運動は、衝突現象などに比べれば、緩やかな現象であるから慣性抵抗としては $m_x(0) \cdot \dot{v}$ を使っ

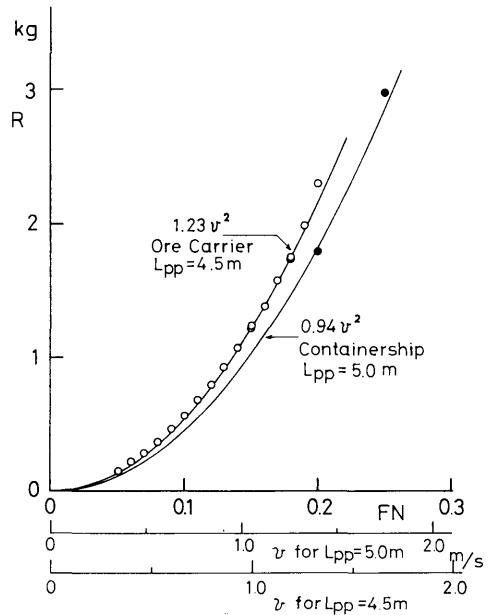


Fig. 12 Relation between resistance and speed

てよいと考えられる。また、プロペラを回したことによる抵抗増加については、通常取扱いのように推力減少係数 t で現わすこととし抵抗の方には入れないものとする。次に定速運動に対する抵抗は、角水槽で通常模型実験を行なう速度範囲では速度の2乗に比例するとしてよい場合が多い。Fig. 12 は本文中で検討の対象にしたコンテナ船模型と鉱石船模型の抵抗試験結果が速度の2乗で表わされることを示す例である。従って(1)式の抵抗 $R(v, \dot{v}, n)$ は

$$R(v, \dot{v}, n) = m_x(0) \cdot \dot{v} + C_R \cdot v^2 + t \cdot T(v, \dot{v}, n) \quad (2)$$

となる。

次にスラスト T に関しては、推力減少係数 t を含めて加速度の影響をほとんど受けないとされているので³⁾、 $T(v, \dot{v}, n) = T(v, n)$ と考える。プロペラの単独試験結果のスラストは普通、次の2次式で極めて良く近似できる。

$$K_T = T / \rho n^2 D^4 = aJ^2 + bJ + c \quad (3)$$

但し、 ρ は水の密度、 D はプロペラ直径、 $J = v_A / nD$ (前進係数) である。船後のプロペラを考えると、伴流係数 w を使って $v_A = (1-w) \cdot v$ とするが、この w も加速度の影響は受けないとして扱う。Fig. 13 は、本文中で検討対象にしたコンテナ船模型と鉱石船模型に使用したプロペラの単独試験結果であるが、スラストが(3)式で良く表わされることを示している。(3)式の右辺の係数は、 a 、 b が必ず負、 c が必ず正である。

(2)、(3)を(1)に代入すると結局、次のような模型船の加速運動を表わす運動方程式が得られる。

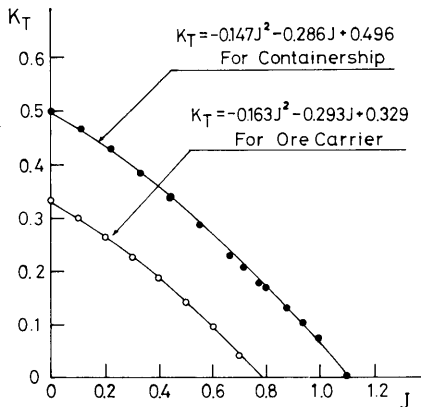


Fig. 13 Results of propeller open test

$$\dot{v} + Anv + Bv^2 = Cn^2 \quad (4)$$

但し

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{\rho D^3 (1-w)(1-t)b}{m+m_x(0)} > 0 \\ B &= \frac{C_R - \rho D^2 (1-w)^2 (1-t)a}{m+m_x(0)} > 0 \\ C &= \frac{\rho D^4 (1-t)c}{m+m_x(0)} > 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

で、 a 、 b が負、 c が正であるから、 A 、 B 、 C は必ず正である。推力減少係数 t との混同を避けるために時間を s で表わすことにして、微分方程式(4)の解は、 $s=0$ で $v=0$ の初期条件で解くと (附録2、参照)

$$\alpha, \beta = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4BC}}{2} \quad (6)$$

とにおいて

$$v = \frac{\alpha n}{B} \cdot \frac{1 - e^{(\beta - \alpha)ns}}{1 - \frac{\alpha}{\beta} e^{(\beta - \alpha)ns}} \quad (7)$$

となる。

$$\beta - \alpha = -\sqrt{A^2 + 4BC} < 0 \quad (8)$$

であるから、最終的に達する速度 v_e は

$$v_e = \frac{\alpha n}{B} \quad (9)$$

と表わされる。 C_R が一定、即ち抵抗が速度の2乗に比例するとしてよい速度範囲では、 $1-w$ 、 $1-t$ も殆んど速度によって変化しないとしてよいし、実際角水槽における模型実験では、その範囲の速度で行うことが大部分であるので、(9)式から終速 v_e はプロペラ回転数 n に比例すると考えてよいことが判る。Fig. 3、Fig. 4 のプロペラ回転数と速度の関係に示される通りである。

終速 v_e に達するまでの過渡現象は(7)と(9)から

$$\frac{v}{v_e} = \frac{1 - e^{(\beta - \alpha)ns}}{1 - \frac{\alpha}{\beta} e^{(\beta - \alpha)ns}} \quad (10)$$

で表わされるので、プロペラ回転数 n は高いほど定速に達する迄の時間が短くてすむということになる。こ

これは、模型船の設定速度が高いときほど早く速度が整定するという点であるから、角水槽のような限られた水面を有効に使うという点で、都合のよい性質である。次いで(10)式において α/β を仮に固定して考えると $\beta-\alpha$ の絶対値、即ち $\sqrt{A^2+4BC}$ が大きいほど早く定速に達するという点であるから、(5)式の表示式で判るように、船の慣性力に対してプロペラ直径が大きいほど定速に達する迄の時間が短いということになる。しかし、これは高速船と低速肥大船の応答速度の違いを定性的に説明するには使えるが、同じような船型についてもっと細かい違いを議論する場合には、(10)式で α/β を固定して考えるわけにはいかず、この場合は $|\beta-\alpha|$ は大きいほど、 $|\alpha/\beta|$ は小さいほど応答が速いということになるので、(5)式の A, B, C の値の大きさと応答速度の関係は、 A については大きいほど応答が速くなる傾向にあることは言えるが、 B と C については簡単には言い表わせない。

5. 最適加速法

プロペラ回転数 $n=n_e$ で模型船が達する最終速度 v_e を目標速度とすると、これは(9)式から

$$v_e = \frac{\alpha n_e}{B} \quad (11)$$

である。

次にプロペラ回転数を $s=0$ でステップ状に $n=0$ から $n=n_a$ まであげるか、或いは模型船を拘束しておいてプロペラ回転数を n_a にしておき、 $s=0$ で拘束を解かしたとき、 S 秒後に(11)で表わされる速度 v_e まで達するものとする、(7)式の右辺で $n=n_a, s=S$ とし左辺を(11)で置きかえて

$$\frac{\alpha n_e}{B} = \frac{\alpha n_a}{B} \cdot \frac{1 - e^{(\beta-\alpha)n_a s}}{1 - \frac{\alpha}{\beta} e^{(\beta-\alpha)n_a s}} \quad (12)$$

という関係が得られ、これから S を求めると

$$S = \frac{1}{n_e(\beta-\alpha)} \ln \frac{n_a/n_e - 1}{n_a/n_e - \alpha/\beta} \quad (13)$$

となる。

即ち(13)式で表わされる時間 S だけ加速回転数 n_a で模型船を加速すると、目標速度 v_e に達することになる。次にこの目標速度に達した瞬間に、本来の回転数 n_e に戻したとき、その後の模型船の運動を調べてみよう。この場合は、加速運動の微分方程式(4)を解くのに、

初期条件として

$$s=S \text{ で } v=v_e \quad (14)$$

を使えばよいことになる。(4)の一般解は (A.7) より

$$v = \frac{\alpha n_e C_1 e^{\alpha n_e s} + \beta n_e C_2 e^{\beta n_e s}}{B(C_1 e^{\alpha n_e s} + C_2 e^{\beta n_e s})} \quad \alpha > 0, \beta < 0 \quad (15)$$

であるが、初期条件(14)により

$$v_e = \frac{\alpha n_e C_1 e^{\alpha n_e S} + \beta n_e C_2 e^{\beta n_e S}}{B(C_1 e^{\alpha n_e S} + C_2 e^{\beta n_e S})} \quad (16)$$

となり、一方(15)において $s \rightarrow \infty$ では終速

$$v_e = \frac{\alpha n_e}{B} \quad (17)$$

にならなくてはならないから(16)、(17)の右辺を等置して定数 C_2 を決めると $C_2=0$ となり、これを(15)に代入して、結局

$$v = \frac{\alpha n_e}{B} \quad (18)$$

となり、 $s \geq S$ では、目標速度の一定値となる。以上の関係を図で示すと Fig. 14 のようになる。即ち、プロペラ回転数 n_a で時間 S だけ加速し、 $v=v_e$ に達した瞬間に回転数を目標速度 v_e に対応する回転数 n_e まで落とせば、その後は、 v_e の定速で模型船は航走することになる。これは、最適加速法にほかならない。しかしながら、リアルタイムで模型船の対地速度を検出できる精度の良い (1cm/sec の精度があればよい) 安定したセンサーが現状では見あたらなことから、速度センサーを使用しないことを前提にしているため、目標速度 v_e に達した瞬間というのは判らないわけである。

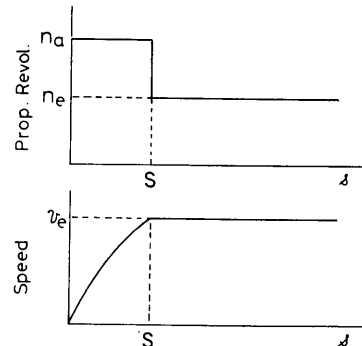


Fig. 14 Optimum acceleration

また、仮にこれが判ったとしても、 v_e に対応する回転数 n_e というのが、実験前には判らないのが普通であって、設定しようとする回転数 n_e が判らないわけである。角水槽における実験では、このように目標速度に対する回転数が判らないため、回転数以外は同じ状態にして、回転数のみ変えて数回航走し、目標速度に対する値を内挿するという方法を通常としている。従って、角水槽における最適加速法は、最終速度 v_e は不明であるけれども、これに対応するものとして設定する回転数 n_e と、これに対する加速回転数 n_a を与えたときに、速力の時間変化が Fig. 14 で表わされるような形になるようにすることであって、(13)式で表わされる S が、この場合の最適加速時間を与えるものである。

加速回転数 n_a は、模型船に搭載したモーターの容量とか、自航動力計を軸系に含んでいる場合は、その容量などによって制限を受けるが、空気吸込等を起こさない範囲で可能な限り高い方が、短時間に加速できるので望ましいと考えられる。従って n_a は決まったものとして、最適加速時間 S を決めることが実験技術

上のポイントである。

6. 慣性力に対しプロペラスラストが大きい船の最適加速時間の検討—コンテナ船の場合—

6.1 平水中

上に述べたように、角水槽における自航模型船を使った実験では、設定プロペラ回転数 n_e と加速回転数 n_a を与えたときに、最適加速時間 S を決めることが必要である。以下に平水中の場合についていくつかの推定方法を検討してみる。推定方法自体はどのような船型に対しても共通であるが、本章では具体的な検討対象としてコンテナ船を扱っている。

6.1.1 最適加速時間の理論式から推定する方法

(13)式から最適加速時間 S を求めようとするとき、 α と β の値が必要であるが、それには(5)及び(6)式から判るように、プロペラの単独特性を表わす係数 a , b , c 及び推力減少係数 t , 伴流係数 w , 抵抗係数 C_R 及び前後方向の船の附加質量 $m_x(0)$ が必要である。Table 1 に本報告で実験例として示してあるコンテナ船と鉱石船についてのこれらの計測値を示す。但し $m_x(0)$ につ

Table 1 Estimated values of α and β (container ship and ore carrier)

ITEM	CONTAINER SHIP	ORE CARRIER	REMARKS
L_{PP}	5.0 m	4.5 m	
B	0.726m	0.750m	
d	0.271m	0.280m	
C_b	0.572	0.820	
m	57.45kg	78.98 kg	mass
$m_x(0)$	1.90kg	5.53 kg	added m.
a	-0.147	-0.163	} eq.(3) Fig. 13
b	-0.286	-0.293	
c	0.496	0.329	
D	0.186 m	0.114m	prop. dia.
$1-w$	0.73	0.45	} Fig. 12
$1-t$	0.90	0.81	
C_R	0.94	1.23	
A	0.002078	0.000191	
B	0.02003	0.01497	} eq.(5)
C	0.000918	0.0000543	
α	0.0037	0.000811	} eq.(6)
β	-0.00545	-0.00100	

いては、元良のチャート⁴⁾から求めた推定値である。これらの値を使って(13)式で計算した最適加速時間 S と、先に Fig. 11 で示した試行錯誤的に模型実験で求めたコンテナ船の結果とを比較して Fig. 15 に示してある。(13)式による推定値が比較的良好な推定値になっていることが判る。しかし、角水槽における模型実験では、普通、抵抗試験や自航試験、或いはプロペラ単独試験などは行わないことが多いので、この方法による推定はあまり一般的とはいえない。但し、何らかの方法でプロペラ単独特性、抵抗係数、自航要素等が精度良く推定できるようになれば、この方法も使えるようになるかもしれない。なお、ここで推定した α, β を使って(7)式から速力の時間変化を推定し、プロペラ増速なしの実験結果と比較したものが Fig. 16 であるがこの推定も比較的良好なものになっている。但し、 v_e を(9)式で推定すると、自航要素や抵抗係数の推定誤差のため数%の誤差が出てしまうので、 v_e は実験結果から推定した値を与え(10)式の方で計算したものである。

6.1.2 プロペラ増速なしの模型実験から推定する方法

プロペラ増速による加速をしない場合の模型船の速力の時間変化は(10)式で表わされるから、これとプロペラ増速なしの模型実験の速力の記録データとの fitting によって α, β を決め、これを使って(13)式で最適加速時間 S を決めることができる。この場合は、未知数が α, β の2つあって、fitting によって α, β を決めるには、(10)式で $s=s_1, s_2$ の2点で v/v_e を与えて α, β を求める方程式を、はさみ込み法によって解かなくてはならないため、電卓による手計算では困難である。Fig.

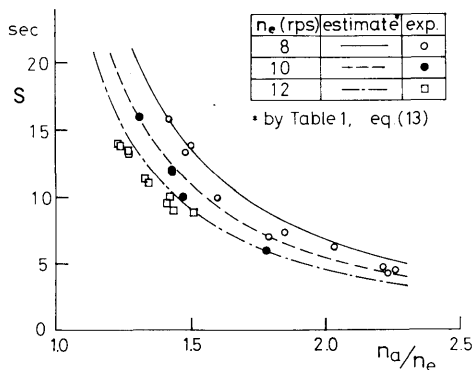


Fig. 15 Optimum acceleration time (comparison between experiment and estimation by eq. (13), container ship, in still water)

17 は、パソコンを用いて解いた α, β を使って(13)式で計算したものと、実験との比較である。Fig. 18 は fitting の精度を示すものである。6.1.1 の方法と同程度の或いはもっと精度のよい推定ができているが、加速回転数の高い方での S の推定は両者ともやや悪いようである。fitting は、 $v/v_e=0.6$ と 0.9 及び $v/v_e=0.7$ と 0.9 で行ってみたが両者の差は、Fig. 17, Fig. 18 で識別できるほどの値にはならなかった。

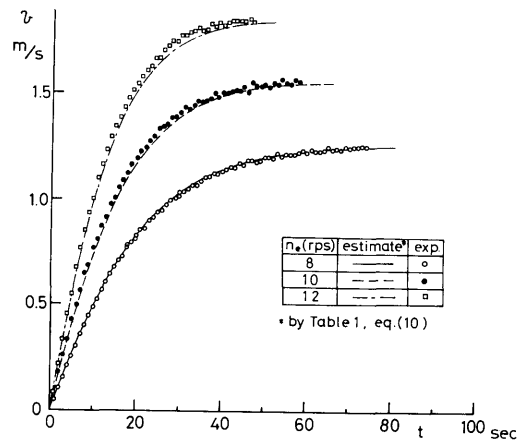


Fig. 16 Comparison of speed between experiment and estimation by eq. (10) (container ship, in still water)

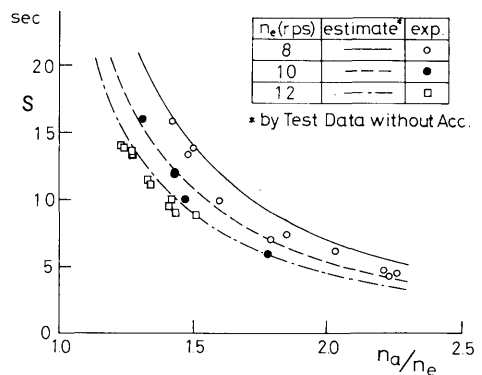


Fig. 17 Optimum acceleration time (comparison between experiment and estimation by test without acceleration, container ship, in still water)

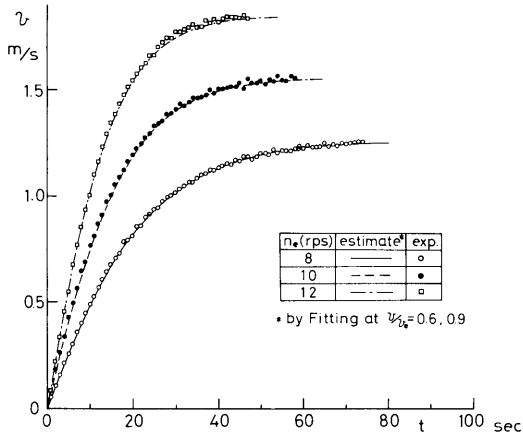


Fig. 18 Example of fitting of speed (container ship, in still water)

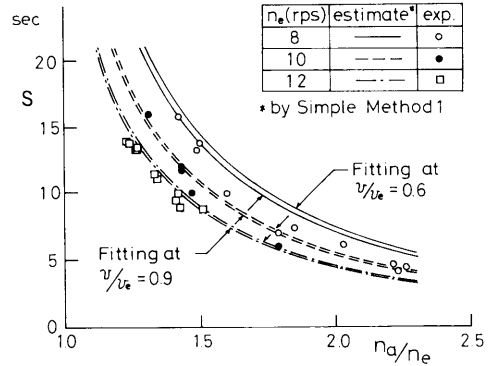


Fig. 19 Optimum acceleration time (comparison between experiment and estimation by simple method 1, container ship, in still water)

6.1.3 プロペラ増速なしの模型実験から

推定する簡易法 1

模型船の加速運動の方程式(4)において速力の2乗に比例する抵抗と考えるとよい Bv^2 に比べ、速力に比例する抵抗ともみなせる Anv が小さいとして無視すると

$$\alpha, \beta = \pm \sqrt{BC} \tag{19}$$

$$\frac{v}{v_e} = -\tanh \frac{\beta - \alpha}{2} ns \tag{20}$$

となる。

最適加速時間 S の表示式は

$$S = \frac{1}{n_e(\beta - \alpha)} \ln \frac{n_a/n_e - 1}{n_a/n_e + 1} \tag{21}$$

である。

この場合は、実験の記録データとの fitting は簡単にできて(20)式から

$$\beta - \alpha = \frac{1}{ns} \ln \frac{1 - v/v_e}{1 + v/v_e} \tag{22}$$

と表わせるから、これに $s = s_1$ で v/v_e を与えて $\beta - \alpha$ を求め、これを(21)に代入して S を求めることができる。Fig. 19 は、このようにして求めた S と実験結果の比較を、Fig. 20 は fitting の精度を示すものであるが、6.1.2 のような面倒な方法を使わなくても良いことが判る。fitting を行う場所による差も小さく、Fig. 19 に示すように $v/v_e = 0.6$ で行ったものと $v/v_e = 0.9$ で行ったものとの差は少ない。ただどちらかという $v/v_e = 0.9$ で fitting を行ったものの方が実験値に近

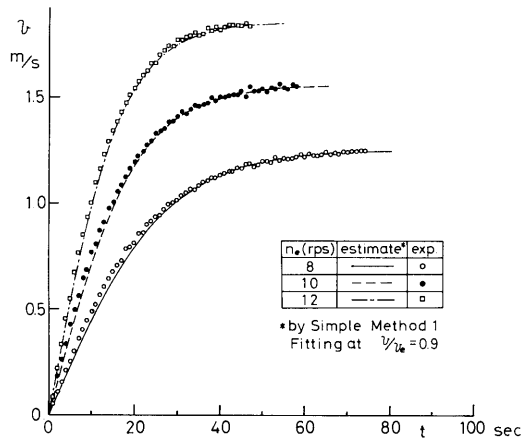


Fig. 20 Example of fitting of speed (simple method 1, container ship, in still water)

い傾向にある。

ここで使ったような仮定、 $Bv^2 \gg Anv$ 即ち $\alpha \approx -\beta$ は、Table 1 のコンテナ船、鉱石船の例でもそれほど外れた仮定ではないと考えてよいが、更に模型実験の記録との fitting から推定する場合、実際には Anv は Bv^2 に対して無視されたのではなく $A'nv^2$ の形で、取り込まれていることになるため、即ちプロペラ単独試験結果を(3)式の形ではなく $K_T = a'J^2 + c'$ の形で表わしたのと同じことになるために、かなり良い推定になったものと解釈できる。

6.1.4 プロペラ増速なしの模型実験から推定する簡易法 2

今度は逆に $Anv \gg Bv^2$ を仮定する。この仮定自体は、物理的に考えても、また Table 1 の数値例から考えても妥当な仮定とは言い難いが、6.1.3 で述べたのと同じように模型実験結果の fitting から求める場合には、非線形項 Bv^2 を等価線形化して $B'v$ と表わしたことになるし、一般に応答の遅れを伴う過渡現象がこのような一次遅れの型で表わされることが多いので検討しておくことにする。この場合は、

$$\alpha = 0, \beta = -A \tag{23}$$

$$\frac{v}{v_e} = 1 - e^{\beta n s} \tag{24}$$

$$S = \frac{1}{n_e \cdot \beta \cdot n_a / n_e} \ln(1 - n_e / n_a) \tag{25}$$

である。fitting は(24)式から

$$\beta = \frac{1}{ns} \ln(1 - v/v_e) \tag{26}$$

を使えば良い。

Fig. 21はこのようにして求めた推定結果と実験との比較である。 $v/v_e = 0.9$ で fitting を行って推定したものが実験と良く合っており、特に増速回転数の高いところでも他の方法による推定より良く合っていて、一見これが一番実用的なようにもみえる。しかし、6.1.3 で述べた簡易法 1 に比べて fitting を行った場所による差が大きくなっており、また Fig. 22 にその

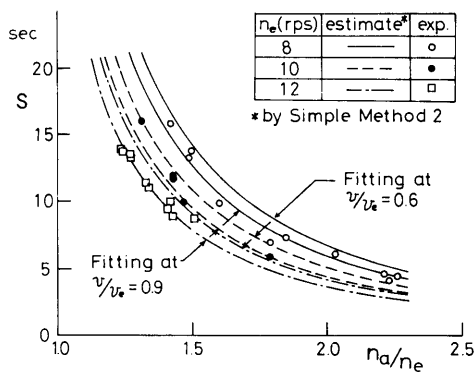


Fig. 21 Optimum acceleration time (comparison between experiment and estimation by simple method 2, container ship, in still water)

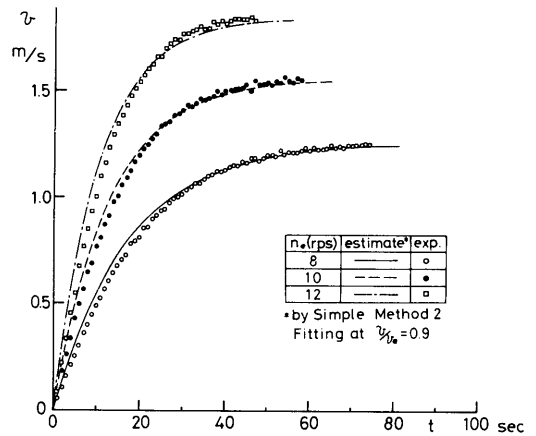


Fig. 22 Example of fitting of speed (simple method 2, container ship, in still water)

fitting の精度を示してあるが、簡易法 1 (Fig. 20 参照) よりも精度が落ちると判断される。これは v^2 に比例する抵抗を等価線形化して v に比例するとした近似的扱いに多少の無理があることの結果と考えられ、やはり推定法としては物理的根拠に妥当性の強い簡易法 1 を使うべきである。

6.2 波浪中

波浪中の場合は、模型船は(2)式で表わされる平水中の抵抗 R のほかに、波浪による抵抗増加 R_{AW} を受ける。 R_{AW} は、波高 h の 2 乗に比例すると考えてよいが、その他に波長 λ 、波との出会角 α によって変化する。仮にこれらを固定して考えた場合に、模型船の速力 v によってどのように変化するかを、参考文献 5)、6) から引用して Fig. 23, Fig. 24 に示してある。但しこれらはスラスト増加 T_{AW} の例であるが、 $1-t$ があ

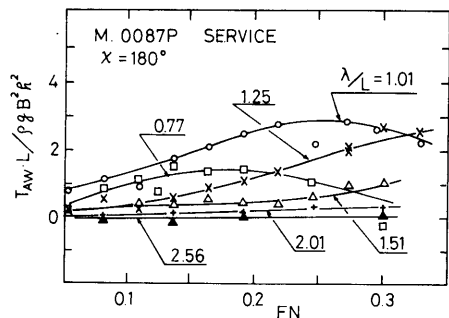


Fig. 23 Thrust idcrease in regular waves versus speed (containeh ship, by TASAKI et al.⁵⁾)

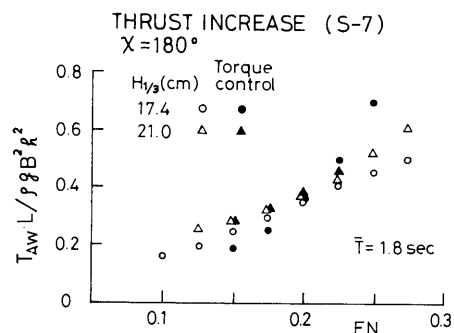


Fig. 24 Thrust increase in irregular waves versus speed (container ship, by YOSHINO et al.⁶⁾)

まり変化しないと考えば $R_{AW} = (1-t)T_{AW}$ として R_{AW} と v の関係を示すものとみなして差しつかえないであろう。これによれば

$$R_{AW} = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 \quad (27)$$

と表わせると考えてよいであろう。係数 c_0 , c_1 , c_2 は波長, 出会角, 波高によって変わるが, 通常の船型の場合 c_0 , c_1 は常に正, c_2 は負になることもとみなしてよさそうである。これを使って加速運動の方程式を書くと, (4)式のかわりに次のように書ける。

$$\dot{v} + (An + c_1')v + (B + c_2')v^2 = Cn^2 - c_0' \quad (28)$$

但し

$$(c_0', c_1', c_2') = (c_0, c_1, c_2) / m + m_x(0) \quad (29)$$

である。

今, α , β を(6)式のかわりに

$$\alpha, \beta =$$

$$-\frac{(A + c_1'/n) \pm \sqrt{(A + c_1'/n)^2 + 4(B + c_2') \cdot (C - c_0'/n^2)}}{2} \quad (30)$$

とおくと, 最適加速時間 S の表示式としては(13)式のかわりに

$$S = \frac{1}{n_e(\beta_a - \alpha_a) n_a/n_e} \ln \frac{n_a/n_e - \alpha_e/\alpha_a}{n_a/n_e - \alpha_e/\beta_a} \quad (31)$$

が得られる。但し α , β は(30)式で判るように平水中と異なりプロペラ回転数 n によって変化することになるので(31)式の α , β の添字 e と a はそれぞれ $n = n_e$ (設

定回転数), $n = n_a$ (増速回転数)に対応する値であることを示すものである。

抵抗増加を(27)式で表わしたときの係数 c_1 は大きいほど, 応答が良くなる傾向にあるが, c_0 , c_2 については, 応答性との関係を簡単に言い表わせない。

次にコンテナ船について c_0' , c_1' , c_2' を推定してみよう。斜波中のスラスト増加 T_{AW} を調べた実験データの一例を Fig. 25 に示す。これは出会角 $x = 150^\circ$, 波高 $h = 7.5\text{cm}$ の例である。速力に関してはフルード数 $F_N = 0.2$ と 0.25 の2点しかないが, Fig. 23 を参考にして, また Table 1 から $1-t = 0.9$ を使って, 抵抗増加 R_{AW} の v による変化を推定したのが Fig. 26 である。抵抗増加の激しい例として $\lambda/L = 1.0$ を, 比較的少ない例として $\lambda/L = 0.6$ をとりあげてみた。これから c_0' , c_1' , c_2' を推定すると Table 2 のようになる。Table 2 には更に波高が2倍になった場合についてこれらの値の推定値を示してある。これらの値を使って(30), (31)式から S を推定したものが Fig. 27 の実線であり, 点線は前に(13)式から求めた平水中の推定値である。抵抗増加があまり大きくない $\lambda/L = 0.6$ の場合は, 低波高 ($h = 7.5\text{cm}$) では平水中と殆んど差はなく (a 図参照), 波高がその2倍になると抵抗増加は4倍になるため平水中との差はある程度出てくる (b 図参照)。抵抗増加の大きな $\lambda/L = 1.0$ の場合は, 低波高 ($h = 7.5\text{cm}$) では, 平水中との差は $\lambda/L = 0.6$, $h = 15\text{cm}$ の場合と大体同じ程度だが (c 図参照), 波高が2倍になると平水中との差はかなり大きくなっていく (d 図参照)。しかし, いづれの場合も波浪中では平水中より S が小さ

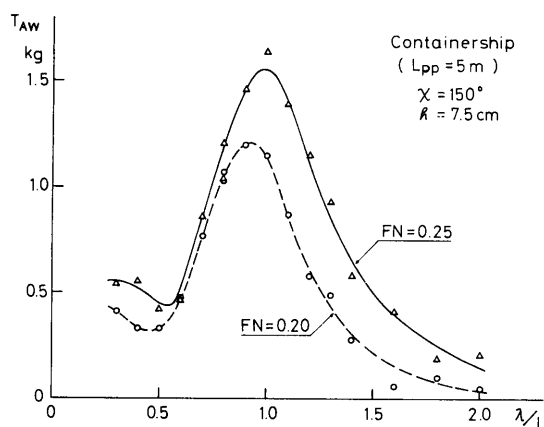


Fig. 25 Example of thrust increase in waves (container ship, $x = 150^\circ$)

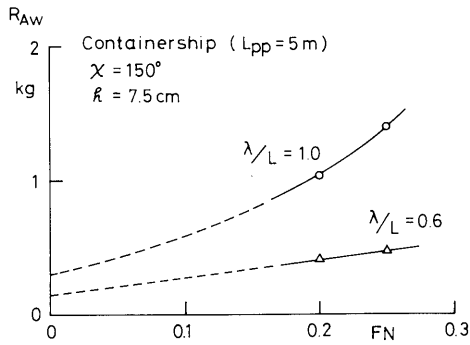


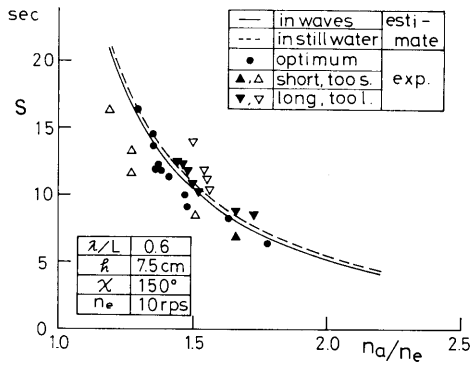
Fig. 26 Example of estimation of resistance increase in waves versus speed (container ship, $\chi = 150^\circ$, $\lambda/L = 0.6, 1.0$)

Table 2 Estimated values of C_0', C_1', C_2' , (container ship)

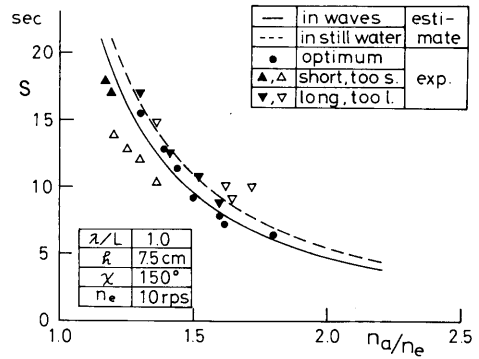
λ/L	0.6		1.0	
$h(\text{cm})$	7.5	15	7.5	15
C_0'	0.0024	0.0098	0.0051	0.0202
C_1'	0.0031	0.0125	0.0022	0.0087
C_2'	0	0	0.0048	0.0193

くなる方向にあり、これは抵抗増加の速力による変化を表わす切式でコンテナ船の場合は v の係数 c_1 の効果が強く現われたものと推測される。

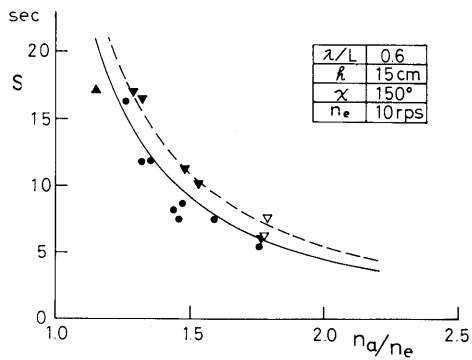
Fig. 27 には、更に波浪中での最適加速時間 S を、平水中と同様な方法で求めた実験結果を示してある。 $\lambda/L = 1.0$, $h = 15\text{cm}$ の例を除くといずれも推定結果と比較的良好一致を示しているとみてよいであろう。



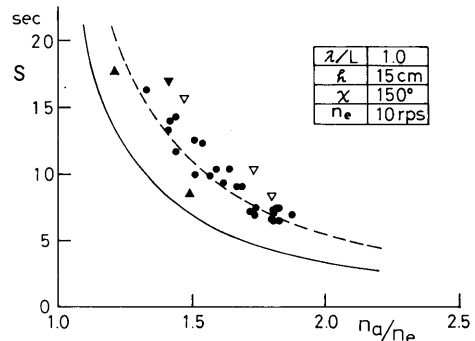
(a) $\lambda/L = 0.6$, $h/\lambda = 1/40$



(c) $\lambda/L = 1.0$, $h/\lambda = 1/66.7$



(b) $\lambda/L = 0.6$, $h/\lambda = 1/20$



(d) $\lambda/L = 1.0$, $h/\lambda = 1/33.3$

Fig. 27 Optimum acceleration time in waves (comparison between experiment and estimation by eq. (31), container ship)

この模型実験では、波が模型船の位置に到達してからプロペラ回転を開始させているが、 $\lambda/L=1.0$ 、 $h=15\text{cm}$ の場合には、Fig. 28の記録例から判るように加速中のプロペラレーシングのために有効な加速推力が不足した結果、推定値より大幅に加速時間が必要だったものと解釈できる。Fig. 29は不規則波中の実験結果の例であるが○印で示した平水中との差はほとんど認められない。

上に例示した推定は、すべて $x=150^\circ$ の場合についてであるが、これは比較のための実験を角水槽で行う場合、航走距離が最大にとれることから質の良いデータが得られるためにこの出会角を選んだものである。他の出会角についても、また他の波長についても波浪中の抵抗増加の速力による変化の様子を(7)式で表わすことにより推定できることは言うまでもない。波浪中の抵抗増加の一般的な性質としては、正面迎波の $x=180^\circ$ から $x=120^\circ$ 程度までは抵抗増加のピークが生ずる波長が短波長側にずれていくがピークの高さそのも

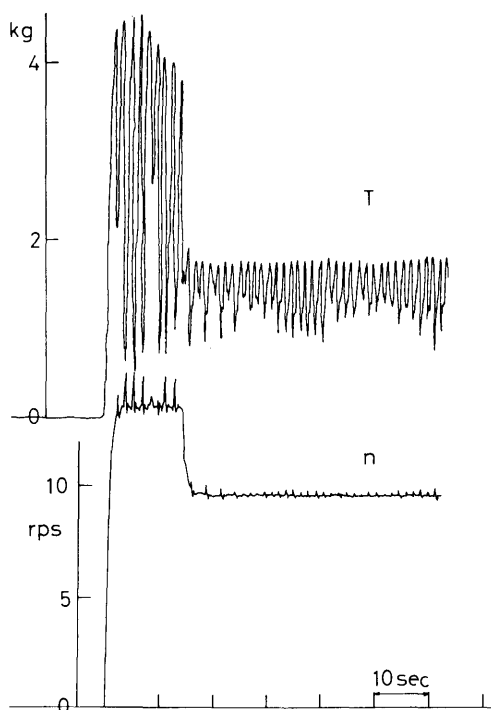


Fig. 28 Example of record of self-propulsion test with propeller racing (container ship, $\lambda/L=1.0$, $h/\lambda=1/33.3$)

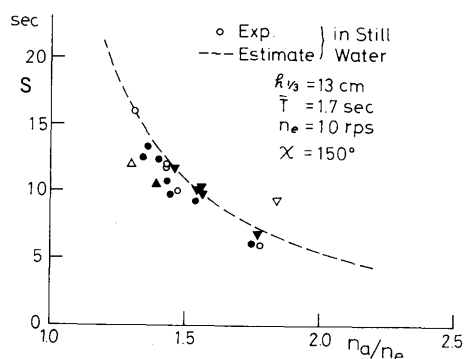


Fig. 29 Optimum acceleration time in irregular waves (container ship, $h_{1/3}=13\text{cm}$, $\bar{T}=1.7\text{sec}$)

のはあまり変わらない⁸⁾。従ってこの範囲の出会角では、ここで例示した $x=150^\circ$ の場合、抵抗増加の大きくなる波長がやや変わってくる他は特に問題にすべき違いはないと考えてよい。横波の $x=90^\circ$ から追い波の $x=0^\circ$ の範囲では、短波長側である程度の値は残るが一般には抵抗増加は少ないので⁶⁾、プロペラレーシングが起こらない限り、最適加速時間 S に関して平水中との差はほとんどないと考えて差し支えない。

以上、波浪中の実験ならびに推定の結果を大ざっぱにみても、極端に抵抗増加が大きくない限り、最適加速時間は波浪中の方が平水中より短いとは言っても平水中と波浪中で大きな差はないとみなせる。波長、出会角、速力によって変化する抵抗増加の性質をいちいち考えて加速時間を決めるのは、あまり現実的とは言えず、角水槽におけるコンテナ船の模型実験では、波浪中においても平水中の値を基本にし、必要ならこれに多少の修正を施すというやり方がもっとも現実的な方法であろう。これはまた、角水槽では、波が模型船の位置に来るのを待ってから船を出すということをする、動揺のため発着場の栈橋にぶつかって模型船を破損したり、或いは斜波では初期方位を保ちにくいなどの事情があって、通常はそのようなことはせず、波速に応じた適当なタイミングで、波がまだ到達しないうちに船を出すのが普通である。従って模型船は最初のうちは平水中で加速され、途中から波浪中で加速されるということになり、この平水中にある時間と波浪中にある時間を考慮に入れて最適加速時間の厳密な推定をするということが、可能ではあるけれども非現

実的であるという事情にもよるものである。

7. 慣性力に対しプロペラスラストが小さい船の最適加速時間の検討—鉱石船の場合—

前章では慣性力に対してプロペラスラストが大きい船の例としてコンテナ船について検討し、最適加速時間についての一応の定量的な知見が得られたが、逆に慣性力に対しスラストが小さい船の場合についても定量的な検討を加えておく必要がある。

鉱石船については、最適加速時間 S を求める模型実験を行っていないが、Table 1 の値を使って(13)式から求めた結果を Fig. 30 に示してある。航海速力付近を考えると、コンテナ船に比べ2~3倍もの加速時間が必要であることが判る。従って角水槽で鉱石船模型の自航試験を行うことを考えれば、モーター及び同制御装置の回転数範囲はできる限り高くできるように設計しておくことが望ましい。また自航動力計を軸系に含む場合には、その容量を大きくしておくか、または、容量を超えても検力部を破損せずにトルク、スラストを伝達できるような構造にすることが必要であろう。将来これらの対策によってもなお加速が不足するようであれば、プロペラとは別系統の加速装置を新たに開

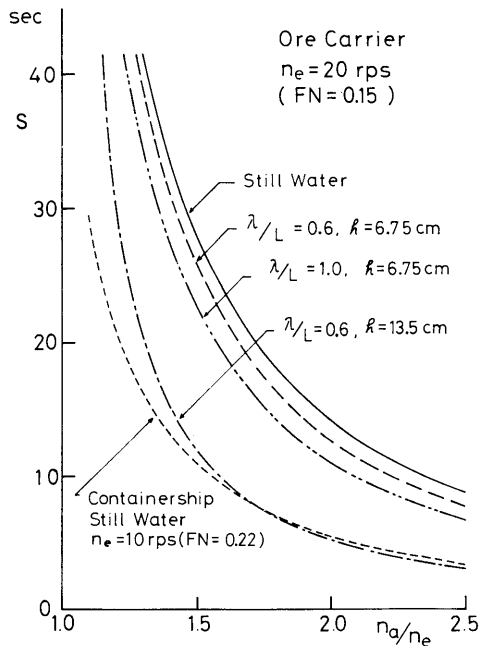


Fig. 30 Optimum acceleration time of an ore carrier (in still water and waves)

発する必要があるかもしれない。

波浪中の場合については、コンテナ船の場合と同様に角水槽における推力増加の実験データ (Fig. 31) から、Table 1 の $1-t$ を使って、抵抗増加 R_{AW} の速力による変化を Fig. 32 のように推定して c_0', c_1', c_2' を決めると Table 3 のようになる。これらの値と Table 1 の鉱石船の諸データを使って(30), (31)式から最適加速時間 S を推定したものを Fig. 30 に示す。鉱石船の場合には、抵抗増加が大きいと、その影響を強く受けて応答がかなり速くなる。角水槽において、従来から行っていた鉱石船の実験で、高波高の場合には速力の整定するのは早いということが経験的に言われていたが、これを裏づける推定結果である。

また、 $\lambda/L = 1.0, h = 13.5 \text{ cm}$ の場合、 $C - c_0'/n^2 < 0$ となり、船が船首の向いている方向には前進できずに後退する状態を現わしており、最適加速時間 S というのはこの場合意味を持たない。 $C - c_0'/n^2 = 0$ の場合は、船が船首方向には前進も後退もせず釣合っている状態であるが、(30), (31)式から明らかのように $S = 0$ である。従って鉱石船の場合、波浪中特に高波高中で速力の整定が早いことは、波浪中での速力低下が大きいことと対応していると考えてよい。ちなみに、回転数一定の場合の速力低下の実験結果の一例を Fig. 33 に示しておく。波高が違うが、コンテナ船に比べ鉱石船の速力低下が非常に大きいことが判る。但しこの図の速力は、模型船の重心軌跡から計算した速力であって船体中心線方向の成分ではない。

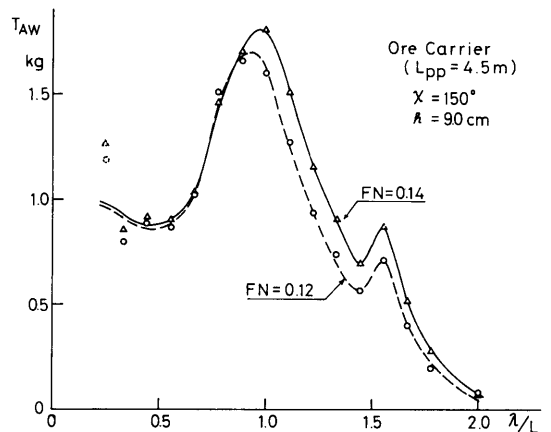


Fig. 31 Example of results of experiment on thrust increase in waves (ore carrier, $\alpha = 150^\circ$)

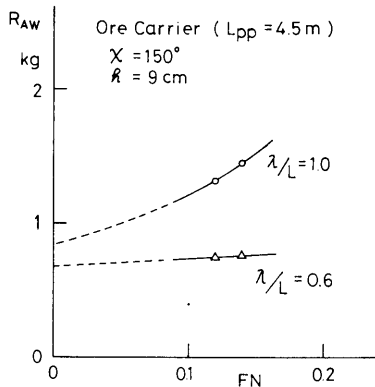


Fig. 32 Example of estimation of resistance increase in waves versus speed (ore carrier, $x=150^\circ$, $\lambda/L=0.6, 1.0$)

Table 3 Estimated values of C_0' , C_1' , C_2' , (ore carrier)

λ/L	0.6		1.0	
$h(\text{cm})$	6.75	13.5	6.75	13.5
C_0'	0.0045	0.0178	0.0056	0.0224
C_1'	0.00056	0.00226	0.0017	0.0068
C_2'	0	0	0.0029	0.0115

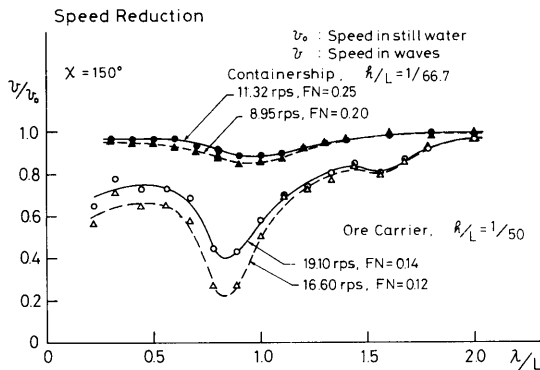


Fig. 33 Example of results of experiment on speed loss in waves (container ship and ore carrier, $x=150^\circ$, revolution constant)

8. ま と め

角水槽の航跡自画装置のデータ解析部は、昭和58年10月に更新する前までは、ミニコン FACOM-R の記憶容量の制限 (4 kw) から、模型船の軌跡はオンラインで XY プロッタに出力するが、速力と方位については、一航走終了毎に、主記憶にとりこまれた 1 秒毎の位置データから、任意の 2 点を指定し、その間の平均速力を LP に出力するという方式であった。従ってある 1 つの航走実験直後に、そのときの模型船の速力がどれくらいあったかは、軌跡の図をみながら大体定速になっただろうと思われるあたりで適当に 2 点を指定し、LP 上に出力された速力をみながら、これを何回か繰り返して、今の速力はいくらとするのが普通であった。しかし、この方式で速力を出すのは、Fig. 10 のように加速が適当であった場合は良いが、Fig. 1, Fig. 2, Fig. 5, Fig. 9 のような場合には精度が落ちることは明らかである。しかも、当時の実験では、加速は適当に手で押し出すか、或いは肥大船の操縦性試験で増速回転数一定で加速時間を変えられる装置を使ったことはあるが、この時も加速時間は適当に設定しただけである。

昭和57年に鉾石船の波浪中馬力増加の実験を行った際に、5 秒毎の指定を繰り返して速力の変動をみたところ、Fig. 2 のような結果が得られ、これの解析にあたっては記録の終わりの方の整定したとみられる部分だけをとる必要があると判断したことから、数100点に及ぶすべての実験で、人力による即時処理で速力変動の解析作画を行ったが、このときに軌跡のほかに速力をオンラインで出力する必要性が強く感じられ、昭和58年に解析部のみ、パソコン SORD-M343 に更新したものである。

鉾石船の実験での人力による速力変動の記録、及びコンテナ船の実験でのパソコンによる速力変動の記録から、模型船の速力の整定があまりにも遅いことが鮮明になり、模型船を加速して早く速力を整定させる実験技術の開発が必要であるとの認識にいたり、今回の検討を行ったものであるが、得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 自航試験結果を、曳引台車のある中水槽での結果と、角水槽での完全自航模型船によるプロペラ増速なしの場合の結果を比較すると、同じ速力を出すのに必要なプロペラ回転数、スラスト、トルクとも角水槽の方が大きな値になる。(Fig. 3, Fig. 4)。これ

は、角水槽での実験が、有効水面の制限から速力が定速に達する前に実験を終了してしまうため、適切な加速を行うことにより質の良いデータが得られ (Fig. 10) 中水槽での結果との差をかなり埋めることができる (Fig. 8)。

- (2) 上のような差は、波高があまり高くない場合には、波浪中実験においても同じように現われるが、波浪中の推力増加のように平水中との差をとるものについては、相殺されて大きな違いにはならない (Fig. 7)。波浪中及び平水中自航要素については $1-w$ にはあまり差は出ないが、 $1-t$ には大きな差がでる (Fig. 6)。
- (3) 模型船の抵抗が速力の 2 乗で表わされる範囲では、模型船の平水中における加速運動の方程式及びその解は、解析的に表わすことができる ((4)式, (7)式)。また、実験との fitting の結果も極めて良い (Fig. 18)。
- (4) プロペラ増速による加速なしの場合、定速に達する迄の時間は、プロペラ回転数が高いほど短くてすむ ((7)式)。
- (5) 模型船の最適加速法とは、目標速力 v_e (未知でよい)に対応するプロペラ回転数 n_e を決めた場合、軸系の制限またはプロペラの空気吸込等から許される範囲での最大の増速回転数 n_a を与え、この増速回転数 n_a で(13)式で表わされる時間 S だけ加速した後、プロペラ回転数を n_e まで落とす方法である (Fig. 14)。
- (6) 平水中の最適加速時間 S を(13)式で推定するのは、プロペラ特性、自航要素、抵抗係数の値等が必要であって、あまり現実的ではない。プロペラ増速なしの模型実験から推定の方が実用的であるが、この場合も厳密な fitting (6.1.2, Fig. 17, Fig. 18) は必要でなく、簡易法 1 (6.1.3, Fig. 19, Fig. 20) で充分である。
- (7) 波浪中の場合の最適加速時間は、波浪による抵抗増加と速力の関係を推定することによって、(31)式で推定できる。また実験結果との一致も比較的良好 (Fig. 27, (a), (b), (c))。しかし、加速中にレーシングを起こすような激しい船体運動がある場合は、(31)式による推定は全く合わない (Fig. 27 (d), Fig. 28)。また、波浪中では、最適加速時間は平水中より短くてすむ (Fig. 27)。漁網や他船を曳航しているときも平水中より短くてすむことが推測される。
- (8) コンテナ船と鉦石船を比較すると、両者の航海速

力付近を考えると、鉦石船の方の最適加速時間は同じ n_a/n_e に対してコンテナ船の 2~3 倍必要である (Fig. 30)。更に模型船のプロペラ回転数は、コンテナ船より鉦石船の方が高くなるのが普通なので、軸系の制限から増速回転数の上限がおさえられると、実際の模型実験ではこの差はもっと大きくなるとみる必要がある。

波浪中では、鉦石船の方がコンテナ船より波浪による抵抗増加の影響を強く受け、高波高では、最適加速時間が大幅に短くなる (Fig. 30)。但しこのときは、船速低下も大きくなっている。

- (9) 波浪中実験において、最適加速時間をどう設定するかは、波浪による抵抗増加が、波長、出会い角によって複雑に変化することと、また模型船位置に波が到達する前に船を出発させるのが普通であることから難しい問題であり、また波高が高くない場合には平水中との差がそれほど大きなものでもないので、当面のやり方としては、平水中の値を基本にして、様子を見ながら短い方に修正する。或いはレーシングを起こすような場合には長い方に修正することもあるという方法が現実的であろう。
- (10) 今後作成する自航模型船のモーター及び制御装置の回転数範囲はできる限り高く設定できるように設計する必要がある。また自航動力計は、容量の余裕をこれまで以上に大きくとるか、容量以上の力がかかっても検力部を破損せずに、回転、トルク、スラストを伝達できる機構にする必要がある。

航跡自画装置のデータ解析部として新たに導入した SORD-M343 の解析プログラムの作成には、海洋開発工学部大松重雄氏、推進性能部堀利文氏、運動性能部原口富博氏、及びソード(株)板倉誠二氏、増尾寿保氏に、また、コンテナ船の最適加速実験にあたっては、運動性能部安野三樹雄氏、電気通信大学学生小林昌明氏にそれぞれ多大のご協力をいただいた。更に中水槽における荷重度変更試験では海洋開発工学部足達宏氏にご指導いただいた。記して感謝の気持を表わします。

また、鉦石船に関するデータは、三井造船(株)昭島研究所との共同研究で得られたものであり、関係各位に謝意を表わします。

参考文献

- 1) 吉野泰平, 猿田俊彦, 吉野良枝: “高速コンテナ船の斜波中におけるスラスト, トルク変動に関する模型実験 $L/B=8$ の 1 軸および 2 軸船につ

- いて” 船舶技術研究所報告, 第11巻第4号 (1974.7)
- 2) 足達宏之: “荷重量変更法の基礎とその応用法について” 日本造船学会論文集, 第154号(1983.12)
 - 3) 仲渡道夫, 小瀬邦治, 寺本定美, 島宗誠一: “船の加減速運動に関する実験的研究 (第1報)” 日本造船学会論文集, 第140号 (1976.12)
 - 4) 元良誠三: “船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて—その2 前後動に対する附加質量—” 造船協会論文集, 第106号 (1960.1)
 - 5) 田崎 亮, 北川弘光, 岡本 洋, 田中 陽: “単螺旋コンテナ船の波浪中試験” 関西造船協会誌, 第158号 (1975.9)
 - 6) 吉野泰平, 松元尚義, 猿田俊彦, 吉野良枝: “高速コンテナ船の斜波中におけるスラスト, トルク変動に関する模型実験(第2報)— $L/B=6.89$ の1軸船について—” 船舶技術研究所報告, 第13巻第5号 (1976.9)
 - 7) 小川陽弘, 松元尚義, 森 政彦: “模型船用航跡自画装置について” 船舶技術研究所報告, 第9巻第1号 (1972.1)
 - 8) 菅 信, 猿田俊彦: “波浪中推進性能に関するコンテナ船と鉦石船の比較実験” 第44回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1984.12)

付録1. 航跡自画装置の更新されたデータ解析部

航跡自画装置の従来のデータ解析部の主な機能は、
 ①模型船の一秒毎の軌跡をリアルタイムでXYプロッタに出力する。
 ②一秒毎の軌跡のデータを紙テープに出力する。
 ③航走終了後、任意の2点を指定し、2点間の平均速力と方位をタイプライタに出力する(繰返し可)。の3点であったが、更新後の主な機能は、
 ①模型船の一秒毎の軌跡をリアルタイムでXYプロッタに出力する。
 ②模型船の一秒毎の速力と方位をリアルタイムでディスプレイ画面に表示し、航走終了後はXYプロッタにも出力する。
 ③航走終了後、模型船の一秒毎の軌跡、速力、方位データをLPに出力する。但し、これは不要ならキーボード上のセンススイッチ「S1」をONにして無効にできる。
 ④航走終了後、模型船の一秒毎の軌跡データをフロッピーディスクに格納する。これも不要ならセンススイッチ「S2」をONにして無効にできるが、フロッピーにとりこんだデータは、オンライン処理用のプログラム(プログラム名

「COURSE1」)の解析と全く同一の解析を、オフライン用のプログラム(プログラム名「COURSE2」)で行うことができるほか、処理プログラムを開発することによって、どのような解析処理にも使えるのでできるだけフロッピーにとりこんでおくべきである。なお、波浪中直進実験の場合で1枚のフロッピー(記憶容量1.2MB)に300~400点の実験データを格納できる。⑤、航走終了後、任意の2点を指定し、2点間の平均速力と方位をLPに出力する(繰返し可)。の5点に要約できる。なお、操舵点信号などの外部信号をとりこめることは、新旧同じである。

プログラムの詳細と、詳しい取扱説明書は運動性能部に備えてあるが、近い将来、本装置は、模型船上の2点の軌跡、或いは複数模型船の軌跡が同時に測定できるようなものに更新する予定であるので、ここではこれ以上の詳細な説明は省略し、Fig. A.1に機器構成図を、Fig. A.2にプログラムのフローチャートを示しておく。

付録2. 船の加速運動の方程式の解

船の加速運動を表わす微分方程式は、本文(4)式にあるように

$$\dot{v} + lv + mv^2 = n \quad (\text{A.1})$$

の形の1階のRicatti形の常微分方程式であるから、

$$muv = \dot{u} \quad (\text{A.2})$$

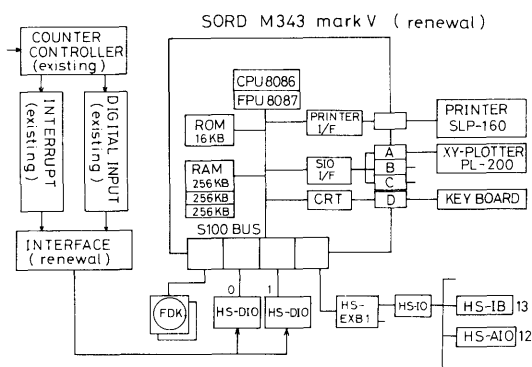


Fig. A.1 Block diagram of a renewed data processing system of an automatic course plotting apparatus

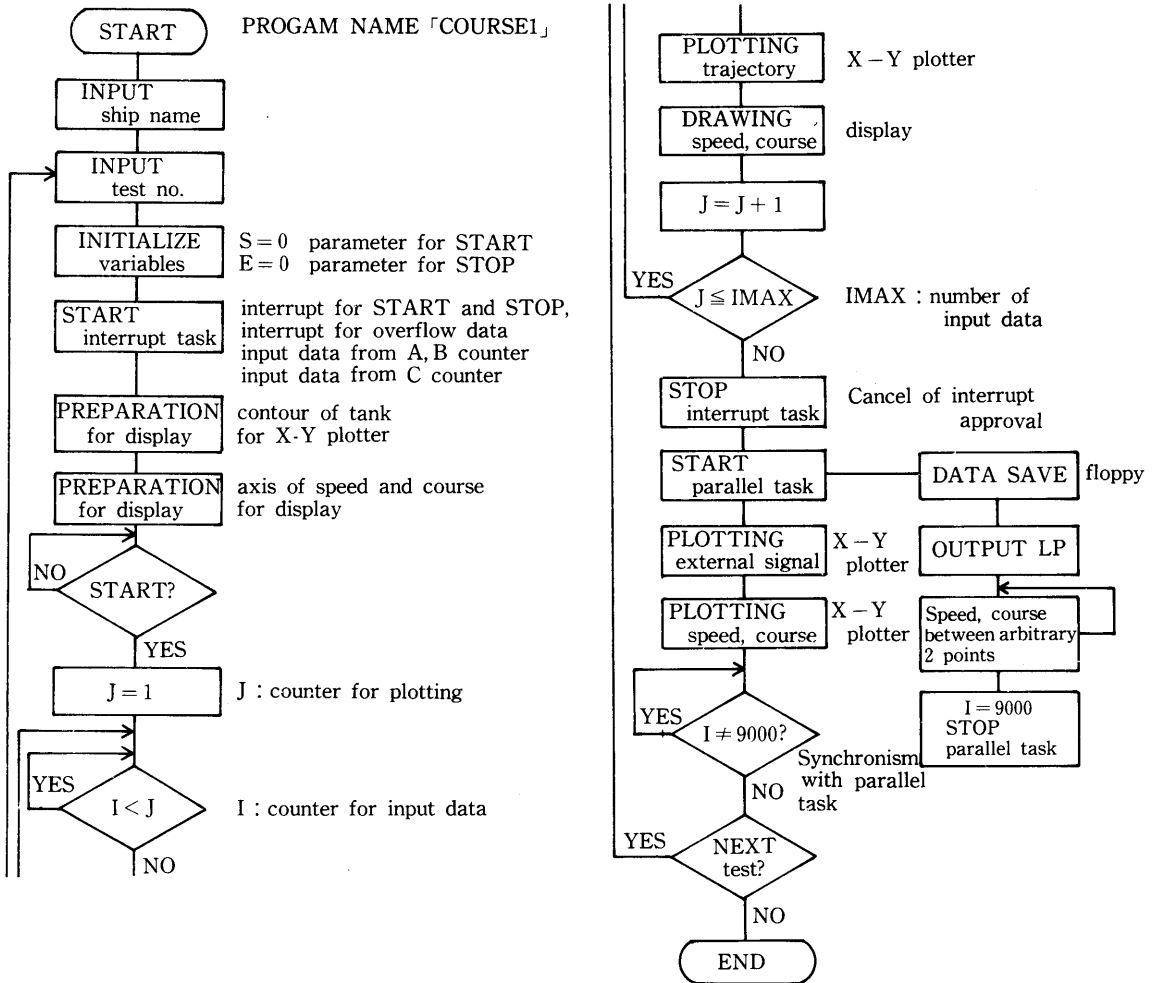


Fig. A.2 Flow chart of a program of the renewed data processing system

の変換を行うことにより、次のような2階の定係数の常微分方程式に変換される。

$$\ddot{u} + l\dot{u} - mnu = 0 \tag{A.3}$$

ここで

$$D^2 + lD - mn = 0 \tag{A.4}$$

の根を α, β とおくと

$$\alpha, \beta = \frac{-l \pm \sqrt{l^2 + 4mn}}{2} \tag{A.5}$$

であるが、今考えている問題では、 l, m, n はすべて正だから α, β はそれぞれ正実根、負実根である。従って (A.3) の解は時間を s で表わして

$$u = C_1 e^{\alpha s} + C_2 e^{\beta s} \tag{A.6}$$

である。(A.6) を (A.2) に代入して元の方方程式 (A.1) の一般解を求めると

$$v = \frac{\alpha C_1 e^{\alpha s} + \beta C_2 e^{\beta s}}{m(C_1 e^{\alpha s} + C_2 e^{\beta s})} \tag{A.7}$$

となる。

ここで、初期条件

$$s=0 \text{ で } v=0 \quad (\text{A.8})$$

を与えると

$$C_2 = -\frac{\alpha}{\beta} C_1 \quad (\text{A.9})$$

の関係が得られ、これを (A.7) に代入して結局 v は

$$v = \frac{\alpha}{m} \cdot \frac{e^{\alpha s} - e^{\beta s}}{e^{\alpha s} - \frac{\alpha}{\beta} e^{\beta s}} \quad (\text{A.10})$$

となり、これが求める解である。